位相反転回路の定量的な研究と，差動増幅器としての使用

交差型位相反転回路の解析と考察

須藤はじめ SUDO Hajime

交差型位相反転回路について，動作原理の解説や定量的に研究した書籍，また利得を求める式などを示した書籍などはなかなか見当たらない．設計上必要に思い，今回，解析と考察を試みた．テーマ1として主に机上で行った回路解析と具体例，テーマ2として差動増幅器としての性格についての研究，理論値と実測値の合致を確かめた．実際に交差位相反転回路を組む際には，ACバランスをとることにより，多少のDC的アンバランスが生じても，実用上の問題はなさそうだ．

はじめに

交差型あるいは交差位相反転と呼ばれる回路は，昭和30年代のモノーラル時代に高級なアンプの位相反転によく採用されたと聞きます．ちょうどそのころに生まれた私にとっては，本誌の製作記事でも，たまにしかお目にかかったことのない回路でしたが，本誌2004年7月号の「6B4G AB級プッシュプル無帰還17Wモノーラルパワーアンプ」という筆者製作記事で採用してみました．

また，無帰還で使用可能な高音質の位相反転回路については，本誌2002年4月号の「6550Aプッシュプル100Wパワーアンプ」にて触れたとおりに限定されます．

結論から述べますと，交差位相反転回路は無帰還でも優れた音質であり，6B4Gの持ち味となる“色付けのないワイドレンジで純粋な音”と“直熱3極管プッシュプルアンプの持つパワフルさ”を生かすことができました．

しかし困ったことに，定量的にこの回路を研究した書籍やゲインを求める式を探してみましたが見当たらず，これは設計上，必須の事柄と判断して，自ら解析と考察を試みました．

今回は，主に机上で行った回路解析（テーマ1）と，差動増幅器（テーマ2）としての性格について研究・考察したいと思います．

まず，歴史的なこととして，交差位相反転回路が採用された**図1**のホワイトパワートロンのパワーアンプと，**図2**の上杉佳郎氏の6L6GCプッシュプルパワーアンプ[1]の各アンプ部を見てください．

次に，武末数馬氏が『パワーアンプの設計と製作（上巻）』第4章ドライバ回路位相反転段[2]にて紹介しているUlric.J.Childs氏の記事（*Radio & Television News*, Oct-Nov, 1951）の回路図（**図3**）の説明の中で，武末氏は「初段部（V_1，V_2）には低μ双3極管，次段（V_3，V_4）には高μ双3極管が使用され，高，低域の平衡も良好とされます．位相反転回路としての利得はV_3，V_4を単純なCR結合回路として使用したときのほぼ1/2程度になります．後段からの負帰還は図の白矢印の点に戻せば良く，またV_2のグリッドに電流帰還をかけたものであります．」と解説しています．

テーマ1．回路解析

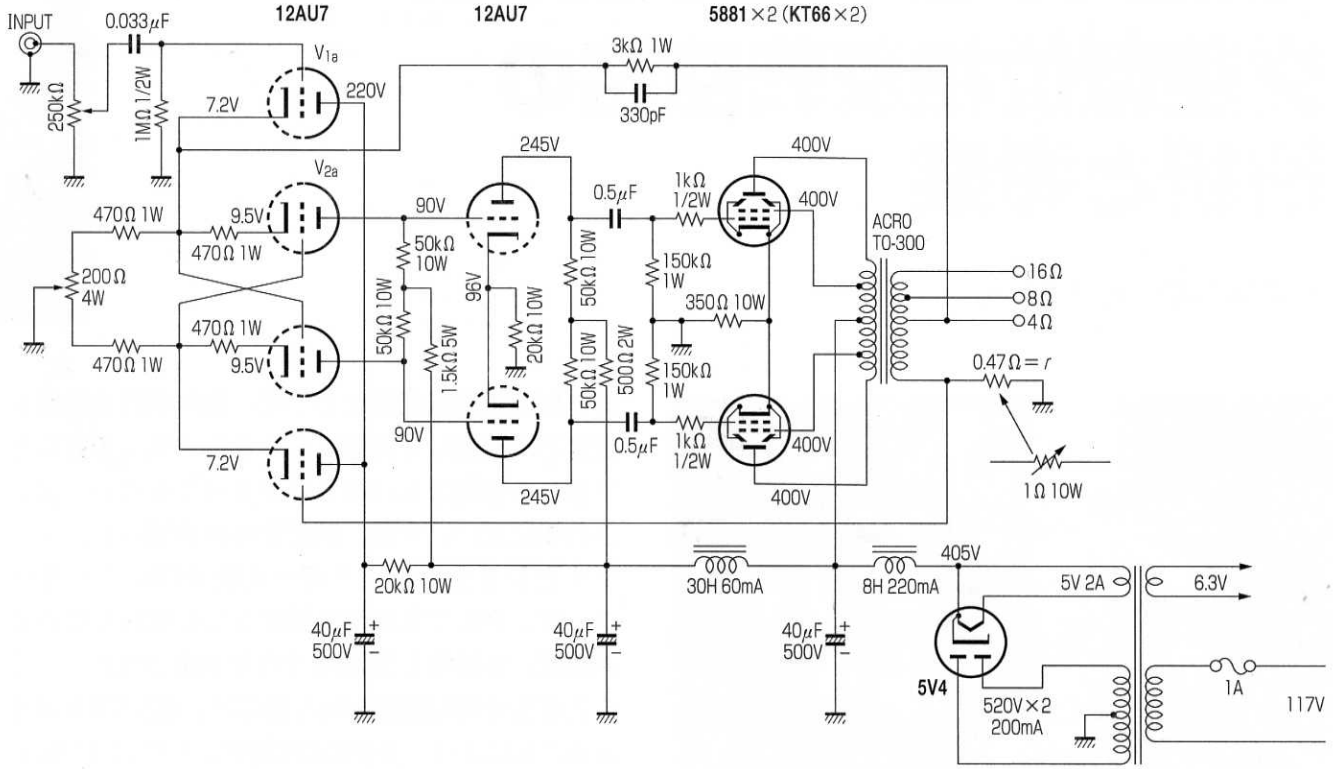
(a) 机上での回路解析

解析に先立ち，この回路は上下に対称性を持っているので，抵抗値と素子の3定数も上下同じと仮定しています．

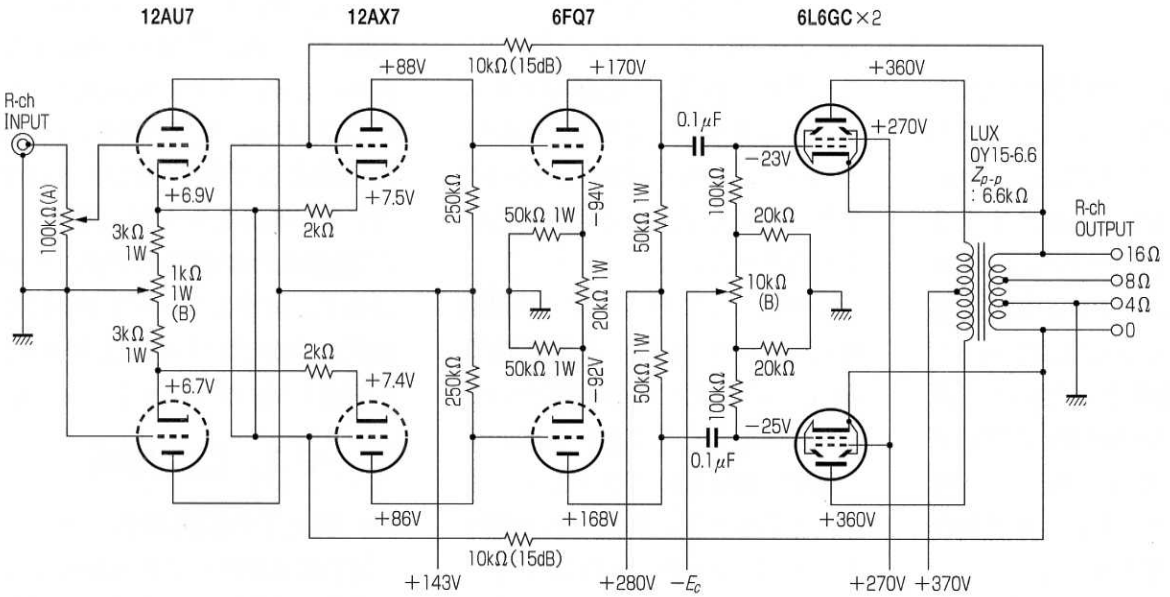
原回路を**図4**に，その等価回路を**図5**に示します．

通常，位相反転として使う場合は，V_3のグリッドはアースに接地されます．

上記のように減らしたつもりでも，なお未知数は12あり，解析は一苦労でしたが，間違いがない



[図1] ホワイトパワートロンアンプ



[図2] 上杉佳郎氏の6L6GCプッシュプルアンプ

ように，2回同じ計算を繰り返しました．

$$(i_1+i_2)\,R_{k1}=e_{k1} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$e_{k1}-e_{in1}\mu_1+i_1r_{p1}=0 \quad \cdots(2)$$

$$e_{k1}+i_2\,(R_{k2}+r_{p2}+R_L)-e_{in2}\mu_2=0 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$e_{out1}=-i_2R_L \quad \cdots\cdots(4)$$

$$(i_3+i_4)\,R_{k1}=e_{k2} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$e_{k2}-e_{in3}\mu_1+i_3r_{p1}=0 \quad \cdots(6)$$

$$e_{k2}+i_4\,(R_{k2}+r_{p2}+R_L)-e_{in4}\mu_2=0 \quad \cdots\cdots(7)$$

$$e_{out2}=-i_4R_L \quad \cdots\cdots(8)$$

各グリッド入力e_{in}の関係は，

$$e_{in1}=E_{in}-e_{k1} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$e_{in2}=e_{k2}-e_{k1}-i_2R_{k2} \quad \cdots(10)$$

$$e_{in3}=0-e_{k2} \quad \cdots\cdots(11)$$

$$e_{in4}=e_{k1}-e_{k2}-i_4R_{k2} \quad \cdots(12)$$

次に(9)～(12)式を(2)，(3)，(6)，(7)式に代入して，各式を整理します．

$$i_1=\frac{e_{k1}}{R_{k1}}-i_2 \quad \cdots\cdots(1)'$$

$$e_{k1}(\mu_1+1)-\mu_1E_{in}+i_1r_{p1}=0 \quad \cdots\cdots(2)'$$

$$e_{k1}(\mu_2+1)+i_2\{R_{k2}(\mu_2+1)+r_{p2}+R_L\}-\mu_2e_{k2}=0 \quad \cdots\cdots(3)'$$

て，プレート側（e_{out1}）には＋の出力が現れます．

一方，e_{k1}の上昇はV_4のグリッド電位を上げますからi_4は増加して，プレート側（e_{out2}）には－の出力が現れます．

この場合，V_3のグリッドに入力がないこともあり，e_{k2}はアース電位と同等とみなしています．よって動作としてはV_2はグリッド接地，V_4はプレートフォロワー回路と理解できます．

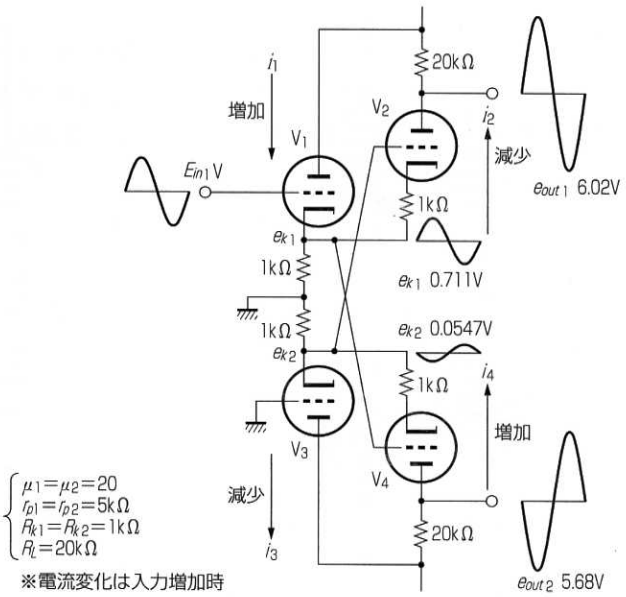
併せて，V_3の役割について考えてみたいと思います．

第一には回路の対称性を保つため，すなわちDCバランスを保つ役割が考えられます．

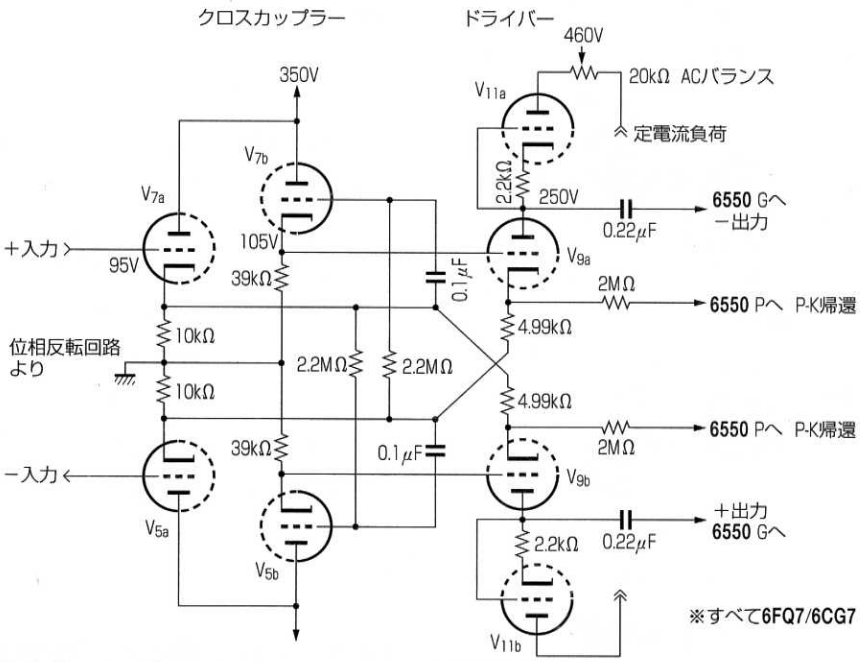
次にAC的な役割を考えます．以上の動作説明では，e_{k2}はアース電位とみなしていました．

しかし，e_{k2}にはわずかながら（0.0547V），E_{in}とは逆相の電圧が生じます．V_4の電流i_4が増加すれば，e_{k2}も上昇しそうに思えます．しかし，e_{k2}が上昇するとV_3のカソード電位が上がり，グリッドは接地されていますので，i_3は減少してしまいますので，e_{k2}の上昇が起こらないと考えられます．

仮にV_3とV_4のi_p変化率が同じなら，お互いに打ち消し合って，$i_3 + i_4$はDC分のみの一定，すなわち交流的には定電流に近くなるのではないか，またe_{k2}は変動がないとすれば，仮想的なアース電位（イマジナルショート）とも推測できます．



［図6］ 解析結果からの動作原理



［図7］ オーディオリサーチDUAL-76の交差差動増幅回路

テーマ2．差動増幅器

以前から交差位相反転回路のV_3のグリッドを－入力として使えないかと考えていました．

従来は先述した武末氏の解説では，V_1のカソードに負帰還を戻すとあり，実際には上杉氏の回路のように，たすき掛けで両カソードに戻される使われ方もよく見受けられますが，V_3のG_1には戻せないかということです．換言すれば，差動増幅器になるのではないかと内心思っていたわけです．

論拠としては，この回路が対称性を持っているということです．

実際，このような動作はすでにオーディオリサーチのDUAL-76パワーアンプにて，出力段6550のドライブ段として存在しています．抜粋した回路を書き直したので，それを**図7**に示します．

位相反転回路は初段に別に存在し，＋入力，－入力と別々に入力されています．かなり凝った回路で，クロスカップラー（交差接続増幅器）＋ドライバーと表現されるこの回路は，V_7，V_5，V_9により構成されます．

mode input（同相入力）

$$E_{in1} = E_{in2} = E_{in}$$

$$e_{out1} = \frac{E_{in}\,\mu_1 R_L\,(C+D)}{B^2 - {r_{p1}}^2\,{\mu_2}^2} \quad \cdots\cdots(29)$$

$$e_{out2} = \frac{E_{in}\,\mu_1 R_L\,(C+D)}{B^2 - {r_{p1}}^2\,{\mu_2}^2} \quad \cdots\cdots(30)$$

次に，各入力に同相等振幅のE_{in}なる入力があったとすると，各出力は上記の式のようになります．

この場合は理想的には，μ_2が充分大きく，$(C+D) \fallingdotseq 0$にて各入力は打ち消されて，出力には何も現れませんが，やはりμ_2が有限値であれば，完全な打ち消しはされません．さらに逆相入力と同相入力の比γをとって差動増幅器としての性能をみたいと思います．

さて，**図12**のように，カソードが定電流源につながれた一般的なカソード結合差動増幅器においては，CMRR（Common Mode Rejection Ratio）を差動性の完全さを表す指標として用います．

ここではCMRRとして，その比γ（逆相入力時/同相入力時）を出してみましょう．

逆相入力の場合，差動的には$2E_{in}$入力されていることとなりますので，e_{out1}に注目した場合，

$$\gamma = \frac{(27)\text{式}/2}{(29)\text{式}}$$

となり，式は次のようになります．

$$\gamma = \left| \frac{C+D}{2(C+D)} \right| \quad \cdots\cdots(31)$$

すなわち，下記の式となります．

$$\frac{(2\mu_2+1)\,(B - r_{p1}\,\mu_2)}{(B + r_{p1}\,\mu_2)} \quad \cdots\cdots(32)$$

ここで，$B \gg r_{p1}\,\mu_2$が成り立ちますので，Bを含むカッコ内の$r_{p1}\,\mu_2$を無視すると，近似値式としては，

$$\gamma = \mu_2 + 0.5 \quad \cdots\cdots(33)$$

となり，やはりμ_2が大きいほうが，性能のよい差動増幅器となることがわかります．

動作例(1)では，(31)式を使うとγ=17.6，(33)式を使うとγ=20.5となります．動作例(5)では，同様にそれぞれγ=81.6，γ=101となります．

まとめ

解析してみると，少し複雑でなかなか奥深い交差位相反転回路でした．

実際に回路を組む際には，R_{k1}やR_LにてACバランスをとることによって，多少のDC的なアンバランスが生じていても，その量は$\mu_2/(\mu_2+1)$程度と大局的には少ないので，実用上は問題はないでしょう．

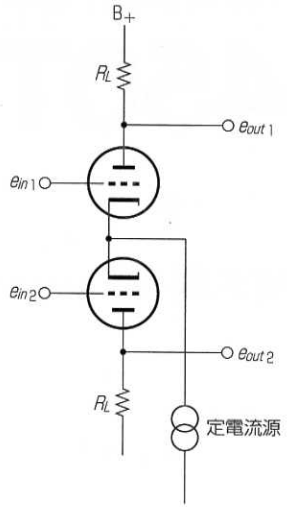
CMRRに関しても改善される可能性があります．ただし実際に使ってみて，ACバランスとDCバランスの両方を同時にとることは難しいように感じます．

また，差動増幅器としても使えるということは，E_{in2}をNFB入力として使える可能性を示唆します．

すでに述べましたが，従来負帰還は**図2**のようにV_1，V_2のカソードに戻され，そのような使われ方はされてこなかったのですが，実際にはどうでしょうか？　きちんと動作するのでしょうか？

実は，ホワイトパワートロンのアンプにその片鱗をみることができます．

図1において，OPT 2次巻線アース側タップは，r(0.47Ω)を介して接地されており，そのタップはE_{in2}，すなわち－入力に相当する12AU7のグリッドに接続されています．さらにこのrは1Ωの可変抵抗にもなっており，これは，β=1の電流帰還と考えられます．電圧帰還は別系統であることを考えると，全体としては電圧電流帰還となります．



［図12］ カソード結合差動増幅回路

一般的には，電圧電流帰還を掛けると，出力インピーダンスを一定の値にすることができ，インピーダンス整合に用いられます．換言すれば，パワーアンプではDF（ダンピングファクター）を可変させるための回路だと推測できます．

ちなみに出力段はUL接続ですし，メジャーループの電圧帰還により，充分出力インピーダンスが低くなっているのでしょう．

このr=0となれば，電流帰還はなくなり，電圧帰還のみとなりますので，DFは最大となります．なかなか巧妙な仕掛けです．

《参考文献》

1）上杉佳郎『管球式ステレオアンプ製作80選（下巻）』誠文堂新光社，1973年．
2）武末数馬『パワーアンプの設計と製作（上巻）』ラジオ技術社，昭和56年8版1刷．
3）金井元『トランジスタ回路設計』pp.47-48，日刊工業新聞社，1974．